

## Структура та механічні властивості зварних з'єднань сплавів системи Al—Cr—Fe—Ti, що містять квазікристалічну фазу

Ю. В. Мільман<sup>1</sup>, Н. П. Захарова<sup>1\*</sup>, М. О. Єфімов<sup>1</sup>,  
М. І. Даніленко<sup>1</sup>, А. І. Самелюк<sup>1</sup>, А. Г. Покляцький<sup>2</sup>,  
В. Є. Федорчук<sup>2</sup>, Г. П. Кисла<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України  
03142, Київ, Україна, вул. Кржижановського, 3

\*E-mail: Zah@ipms.kiev.ua

<sup>2</sup>Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України  
03150, Київ, Україна, вул. Казимира Малевича, 11

<sup>3</sup>Національний технічний університет України “Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського”  
03056, Київ, Україна, пр-т Перемоги, 37

*Досліджено можливість зварювання смуг зі сплаву  $Al_{94}Fe_{2.5}Cr_{2.5}Ti$ , який зміцнено метастабільними наноквазікристалічними частинками, методом тертя з перемішуванням. Смуги зі сплаву  $Al_{94}Fe_{2.5}Cr_{2.5}Ti$  виготовлено без спікання шляхом екструзії водорозпиленних порошків в попередньо вакуумованих і герметичних капсулах. Методами просвічувальної електронної мікроскопії і рентгено-структурного аналізу встановлено, що структура цих смуг має нанорозмірні зерна алюмінієвої матриці, яка зміцнена наноквазікристалічними частинками. Виконано зварювання отриманих смуг методом тертя з перемішуванням. Досліджено структуру та механічні властивості зварного з'єднання. Встановлено, що в процесі зварювання тертям з перемішуванням наноквазікристалічного алюмінієвого сплаву  $Al_{94}Fe_{2.5}Cr_{2.5}Ti$  в шві формується рівномірна суміш зерен матриці з частинками квазікристалів. Показано, що в зоні термомеханічного впливу на границі сполучення шва з основним матеріалом в процесі зварювання відбувається переорієнтація напрямків волокон смуги завдяки пластичній деформації, яка зумовлена обертовим і поступальним переміщеннями інструмента для зварювання тертям. Твердість вихідного матеріалу смуги і зони шва після застосованих режимів зварювання практично не відрізняється. Крім того, за рахунок формування більш рівномірної структури твердість шва є трохи вищою. Міцність зварного з'єднання за кімнатної температури становить 370 МПа, а за температури випробування 300 °С — 170 МПа. Руйнування зварного з'єднання за кімнатної температури відбувається по перехідній зоні і частково по зоні шва, а за температури 300 °С — по зоні шва. Показано, що зварювання методом тертя з перемішуванням є перспективним для отримання зварних конструкцій із сплавів алюмінію, який зміцнено нанорозмірними метастабільними частинками квазікристалів, оскільки дозволяє зберегти в шві квазікристалічну структуру цих частинок.*

**Ключові слова:** алюмінієві сплави, зварювання тертям з перемішуванням, наноструктура, квазікристалічні частинки, механічні властивості, структура, фазовий склад.

© Ю. В. Мільман, Н. П. Захарова, М. О. Єфімов, М. І. Даніленко,  
А. І. Самелюк, А. Г. Покляцький, В. Є. Федорчук, Г. П. Кисла, 2019

## Вступ

Одним із нових і ефективних напрямків створення жароміцних алюмінієвих сплавів, що деформуються, є їх зміцнення нанорозмірними квазікристалічними частинками [1]. Можливість одержання жароміцних алюмінієвих сплавів системи Al—Fe—Cr була показана в роботі [2]. Через метастабільний характер квазікристалів цієї системи вказані сплави можуть бути отримані тільки методами швидкої кристалізації розплаву [2, 3]. Міцність таких матеріалів забезпечується завдяки високій твердості та модулю пружності квазікристалів, об'ємна доля яких досягає 40%, а пластичність — завдяки особливому механізму деформації, що має місце в процесі термдеформаційної обробки матриці алюмінію з нанорозмірними квазікристалами [4, 5].

Для виготовлення деталей та конструкцій з цих сплавів часто використовують зварювання. Однак метастабільний характер зміцнюючих частинок накладає певні температурні обмеження на методи зварювання, які можуть бути використані в технологічному процесі. Зважаючи на це, найбільш прийнятним методом з'єднання таких сплавів є зварювання тертям з перемішуванням, під час якого зварне з'єднання утворюється у твердій фазі без розплавлення основного матеріалу. Формування шва у разі застосування такого методу відбувається завдяки нагріванню до пластичного стану та інтенсивному перемішуванню певного об'єму металу за рахунок тертя робочого інструмента [6—8].

Метою цього дослідження є вивчення можливості зварювання пресованих смуг зі сплаву системи Al—Cr—Fe—Ti, зміцнених метастабільними наноквазікристалічними частинками, тертям з перемішуванням, а також структури і властивостей зварних з'єднань.

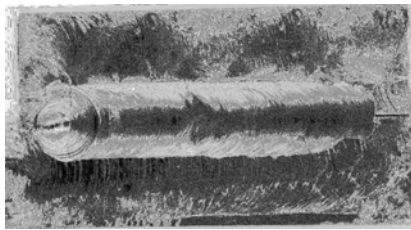
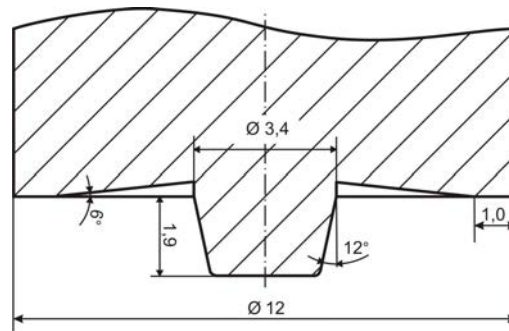
## Матеріали та методи дослідження

З урахуванням результатів, наведених в роботі [9], для досліджень було обрано сплав Al—4,89Fe—4,55Cr—1,68Ti (% (мас.)) (Al<sub>94</sub> Fe<sub>2,5</sub>Cr<sub>2,5</sub>Ti<sub>1</sub>). Для виготовлення порошків дослідного сплаву застосовано оригінальну технологію розпилення розплаву водою високого тиску з запобіганням окисненню завдяки регулюванню водневого показника рН води [10]. Для отримання смуг з водорозпиленних порошків в капсулах з AMg3 виконано наступні операції: холодне пресування порошків, вакуумування та дегазація порошкових капсульованих заготовок за температури 350 °С, екструзія заготовок за температури 400 °С на полосу з перерізом 5 x 30 мм. В подальшому полоси фрезерували для видалення з поверхні дослідних смуг матеріалу капсули.

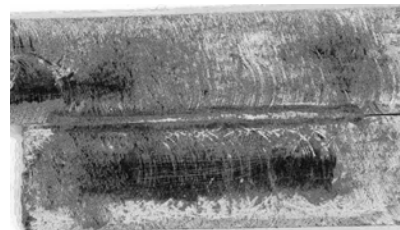
Перед зварюванням заготовки жорстко фіксують у зварювальній оснастці за допомогою механічних прижимів, щоб запобігти їх горизонтальному та вертикальному переміщенням під дією обертально-поступового руху робочого інструмента.

На початку зварювання інструмент, який обертається навколо своєї осі, повільно занурюють до контакту його бурта з поверхнею з'єднуваних заготовок. Коли борт інструмента входить у контакт з поверхнею заготовок, занурювання припиняють, тому що наконечник інструмента проникає практично на всю товщину зварюваного металу, Після цього приступають до горизонтального переміщення інструмента вздовж лінії

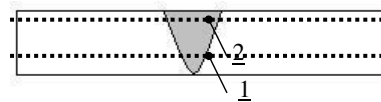
Рис. 1. Ескіз робочої частини розробленого інструмента для зварювання тертям з перемішуванням тонколистових алюмінієвих сплавів лінійними швами. Розміри на рисунку наведено в мм.



*a*



*б*



*в*

Рис. 2. Зовнішній вигляд зварного з'єднання: *a* — поверхня, з якої ведеться зварювання; *б* — зворотня поверхня з'єднання; *в* — схема з'єднання, переріз перпендикулярно напрямку екструзії смуги, пунктирна лінія показує схему фрезерування зразків (лінії 1, 2).

зварювання. У цьому разі інструмент продовжує обертатися навколо своєї осі, виділяючи за рахунок тертя тепло, необхідне для нагрівання металу в зоні зварювання до пластичного стану, і перемішуючи метал в обмеженому просторі [11]. В кінці шва (після закінчення зварювання) інструмент піднімають до повного виходу робочого наконечника зі стику та припиняють його обертання.

Зварювання дослідних смуг здійснювали вздовж напрямку їх екструзії зі швидкістю обертання інструмента 1420 об/хв і швидкістю його лінійного переміщення 6 м/год. Використовували інструмент, виготовлений зі сплаву Р6М5 з діаметром бурта 12 мм і наконечником у формі зрізаного конуса (рис. 1).

Зовнішній вигляд зварних з'єднань представлено на рис 2, *a*, *б*. Перед дослідженням механічних властивостей зварних з'єднань здійснювали фрезерування поверхонь зразків, як показано на рис. 2, *в*. Для дослідження полос та зварних з'єднань використано наступні методи: скануюча електронна мікроскопія (СЕМ) на приладі Superprobe-733, просвічувальна електронна мікроскопія (ПЕМ) на приладі JEM-100СХ. Рентгенографічні дослідження виконували на дифрактометрі ДРОН-УМ1 в  $\text{CuK}_\alpha$ -випромінюванні. Механічні випробування на розтягування проводили на машині 1246 типу INSTRON, твердість визначено на приборі Віккерса з навантаженням 98 Н.

### Результати та їх обговорення

Показано, що в отриманій смузі зі сплаву  $\text{Al}_{94}\text{Fe}_{2.5}\text{Cr}_{2.5}\text{Ti}_1$  спостерігається волокниста структура, де зміцнюючі частинки розміщуються між волокнами матриці вздовж напрямку екструзії. Товщина таких волокон є нерівномірною (рис. 3, *a, б*). Структура смуги являє собою матрицю алюмінію, зміцнену високодисперсними квазікристалічними частинками, середній розмір яких складає 200—400 нм, а розмір зерна алюмінієвої матриці — 300—400 нм (рис. 4). Фазовий склад смуги також підтверджено методом рентгенофазового аналізу (рис. 5, *a*).

Механічні випробування на одноосне розтягування зразків смуги за температур 20 та 300 °C показали, що межа міцності  $\sigma_b$  за температури 20 °C дорівнює 524,5 МПа, відносне видовження  $\delta = 5,5\%$ , а за температури випробування 300 °C  $\sigma_b = 282$  МПа і  $\delta = 4,8\%$ .

Як свідчать результати рентгенофазового аналізу, використання методу тертя з перемішуванням, яке відбувається у твердій фазі без розплавлення напівфабрикатів, дозволяє зберегти в зоні зварного з'єднання метастабільні наноквазікристалічні зміцнюючі частинки (рис. 5, *б*), що підтверджується також і ПЕМ дослідженням (рис. 6).

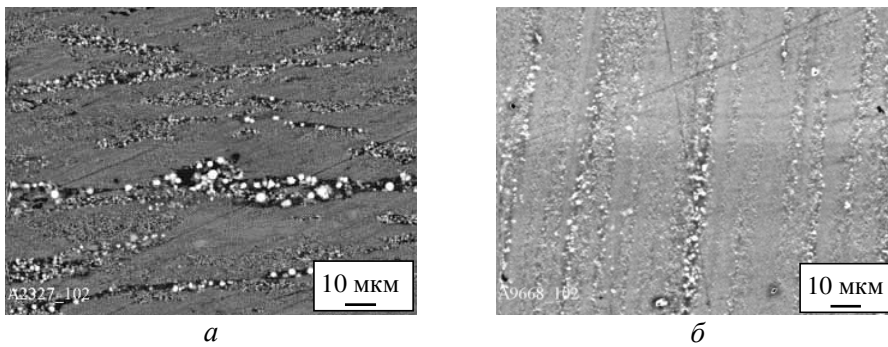


Рис. 3. СЕМ зображення структури смуги сплаву  $\text{Al}_{94}\text{Fe}_{2.5}\text{Cr}_{2.5}\text{Ti}_1$  перпендикулярно (*a*) та паралельно (*б*) екструзії.

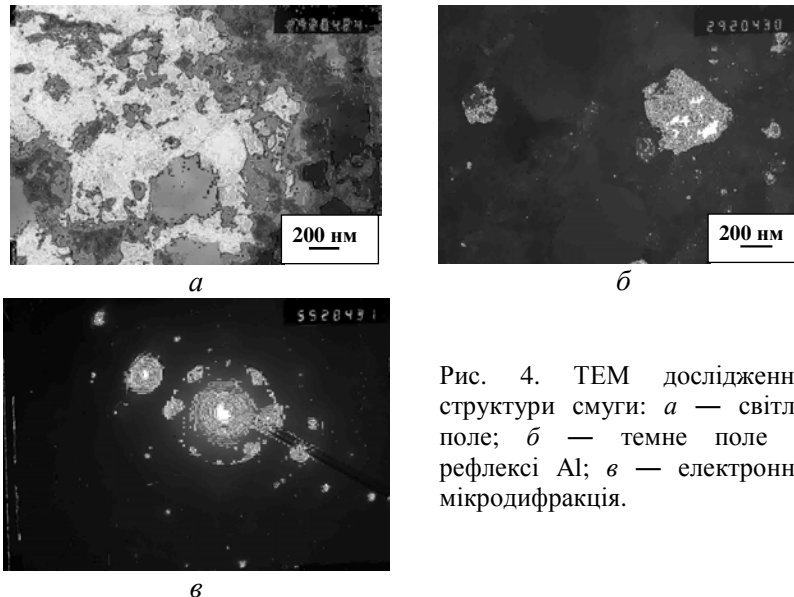
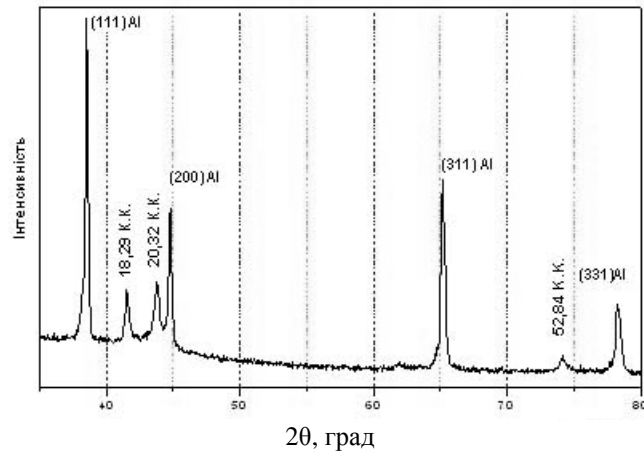
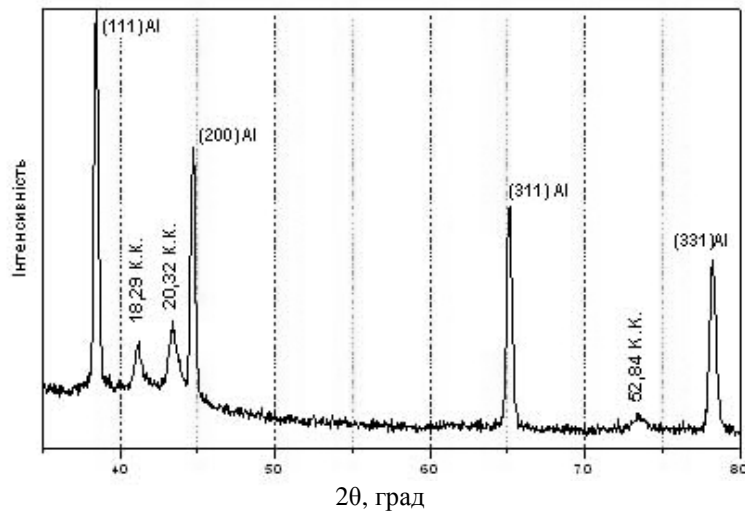


Рис. 4. ТЕМ дослідження структури смуги: *a* — світле поле; *б* — темне поле в рефлексії Al; *в* — електронна мікродифракція.



*a*



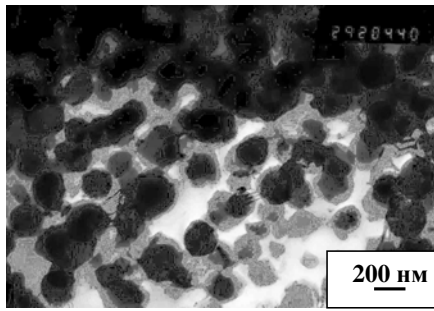
*б*

Рис. 5. Фрагмент рентенограми, знятий з смуги (*a*) та з шва (*б*) (переріз перпендикулярно напрямку екструзії).

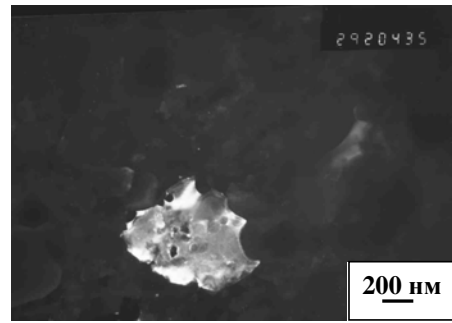
Дослідження структури зварного з'єднання методом СЕМ показало особливий характер перехідної зони, що формується в процесі тертя з перемішуванням. В цьому випадку має місце переорієнтування напрямку волокон смуги (рис. 7, *a*) — в перехідній зоні вони направлені під кутом до уявної лінії з'єднання. В цілому в зоні зварювання формується більш рівномірна структура, ніж у смугі (рис. 7, *б*).

Таким чином, встановлено, що процес тертя з перемішуванням не тільки впливає на формування структури в зоні безпосереднього контакту інструмента, за допомогою якого здійснюється зварювання, а також і у прилеглих до шва шарах основного матеріалу.

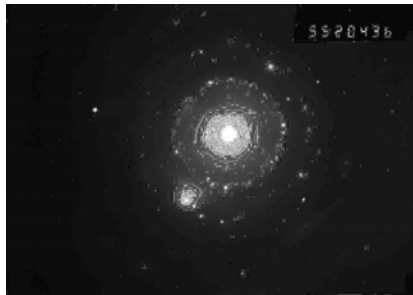
Результати вимірювання твердості зварного з'єднання смуг сплаву  $Al_{94}Fe_{2.5}Cr_{2.5}Ti_1$  показали, що в зоні шва вона складає 1880 МПа, в перехідній зоні — 1690 МПа, а твердість основного матеріалу — 1700 МПа. Зразки зі зварним з'єднанням за температури 20 °С руйнуються по зоні



*a*



*б*



*в*

Рис. 6. ПЕМ дослідження структури матеріалу шва, виконане за методом тертя з перемішуванням: *a* — світле поле; *б* — темне поле в рефлексії Al; *в* — електронна мікродифракція.

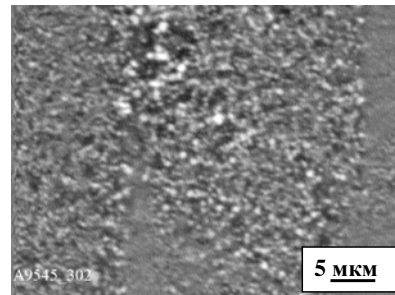
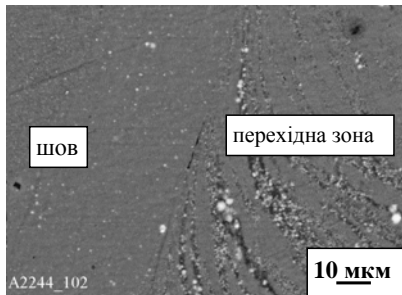
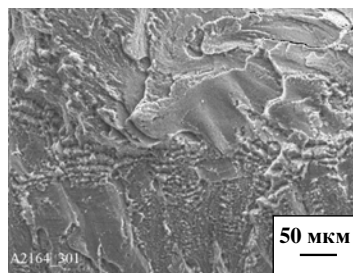
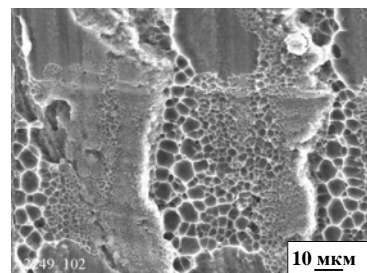


Рис. 7. СЕМ зображення структури зварного з'єднання: *a* — шов та прилегла перехідна зона з'єднання; *б* — ядро шва, отриманого зварюванням тертям з перемішуванням.



*a*



*б*

Рис. 8. Поверхня руйнування зразків за температур випробування 20 (*a*) та 300 °C (*б*).

спряження шва з основним матеріалом (із заходом частково як у шов, так і в перехідну зону). За температури 300 °C руйнування здійснюється виключно по матеріалу шва. Більш високе збільшення температури виявля, що поверхня руйнування має ямки, характерні для в'язкого характеру руйнування (рис. 8, *a*, *б*).

Межа міцності з'єднань за температур випробування 20 та 300 °С знаходиться на рівні 370 та 197 МПа відповідно. Відносне видовження зразків зварних з'єднань значно менше, ніж основного матеріалу. Так, за кімнатної температури цей показник змінювався у межах 2,5—3,3%, а за підвищеної — не перевищував 2,2%, що свідчить про меншу пластичність зварних з'єднань, ніж основного матеріалу.

### Висновки

Відпрацьовано режими зварювання тертям з перемішуванням алюмінієвого сплаву  $Al_{94}Fe_{2.5}Cr_{2.5}Ti_1$ , зміцненого наноквазікристалічними частинками.

Показано, що, на відміну від методів зварювання плавленням, спосіб отримання нероз'ємних з'єднань у твердій фазі тертям з перемішуванням є перспективним для одержання зварних конструкцій зі сплавів алюмінію, які зміцнені нанорозмірними метастабільними квазікристалами, оскільки дозволяє зберегти у шві квазікристалічну структуру зміцнюючих частинок.

Встановлено, що в зоні зварювання формується більш рівномірна структура, ніж в основному матеріалі. Так, структура основного металу є волокнистою — частинки в процесі екструзії перерозподіляються відповідно витягуванню кожної порошокинки вздовж напрямку екструзії і мають вигляд видовжених смуг, в перехідній зоні вони направлені під кутом до уявної лінії з'єднання, а в зоні шва має місце рівномірна суміш зерен матриці та зміцнюючих частинок.

Визначено, що межа міцності з'єднань за температур випробування 20 та 300 °С знаходиться на рівні 370 і 197 МПа відповідно. Мікротвердість в зоні шва та мікротвердість смуги практично не відрізняються і становлять 1800 МПа. Під час випробувань зразків зварних з'єднань у стандартних умовах (20 °С) руйнування відбувається по зоні спряження шва з основним матеріалом (із заходом частково як у шов, так і в перехідну зону). В процесі випробування за температури 300 °С руйнування проходить по матеріалу шва.

### Список літератури

1. Milman Yu.V., Sirko A.I., Iefimov M.O. High-strength aluminum alloys reinforced by nanosize quasicrystalline particles for elevated temperature application. *High Temperature Materials and Processes*. 2006. Vol. 25, No. 1–2. P. 19–29.
2. Neikov O.D., Milman Yu.V., Sirko A.I., Sameljuk A.V., Krajnikov A.V. Elevated temperature aluminum alloys produced by water atomization. *Mater. Sci. & Engineering*. 2008, Vol. 477. P. 80–85.
3. Neikov O.D., Milman Yu.V., Miracle D.B., Lotsko D.V., Sirko A.I., Sameljuk A.V., Yefimov N.A. Properties of rapidly solidified powder aluminum alloys for elevated temperatures produced by water atomization. *Proc. World Congress on Powder Metallurgy & Particulate Materials. Adv. in Powd. Met. & Partic.* (Orlando, USA Mat. 2002). P. 7–14.
4. Milman Yu.V., Lotsko D.V., Neikov O.D. Processing, structure and mechanical behavior of rapidly solidified aluminum alloys containing quasicrystalline particles. *Mater. Sci. Forum*. 2002. Vol. 396–402. P. 723–728.
5. Semenov M.V., Kiz M.M., Iefimov M.O., Sirko A.I., Byakova A.V., Milman Yu.V. Effect of plastic deformation on structure and mechanical properties of

- high temperature strength Al—Fe—Cr powder alloys reinforced by submicroscaled quasicrystalline particles. *Nanosystem, Nanomaterials, and Nanotechnologies*. 2006. Vol. 4, No. 4. P.767–783.
6. Покляцкий А.Г., Ищенко А.Я., Чайка А.А., Лабур Т.М. Сварка трением с перемешиванием — эффективный способ повышения эксплуатационных характеристик конструкций. *Автоматическая сварка*. 2010. № 4. С. 45–50.
  7. А. с. 195846 СССР. МПК В 23к 35/02. *Способ сварки металлов трением* / Ю.В. Клименко. № 1036054/25-27; заявл. 09.11.65; опубл. 04.05.67. Бюл. № 10.
  8. Dolby R.E., Johnson K.I., Thomas W.M. The joining of aluminium extrusions. *La Metallurgia Italiana*. 2004. No. 3. P. 25–30.
  9. Мильман Ю.В., Захарова Н.П., Ефимов М.О., Шаровський А.О., Даниленко М.І. Наноструктурні сплави системи Al—Fe—Cr, зміцнені квазікристалічними частинками для використання при підвищених температурах. *Електронна мікроскопія і прочність матеріалів*. К. : Ін-т пробл. матеріалознавства НАН України. 2012. Вып. 18. С. 16–24.
  10. Neikov O.D., Milman Yu.V., Sirko A.I., Sameljuk A.V. Elevated temperature aluminium alloys produced by water atomisation. Water atomised aluminium alloy powders. *Mater. Sci. and Engineering*. 2008. Vol. 477. P. 80–85.
  11. Покляцкий А.Г. Особенности распределения температур в тонколистовом алюминиевом сплаве АМг5М при сварке трением с перемешиванием. *Автоматическая сварка*. 2011. № 8. С. 48–51.

### **Структура и механические свойства сварных соединений сплавов системы Al—Cr—Fe—Ti, содержащих квазикристаллический фазу**

Ю. В. Мильман, Н. П. Захарова, М. А. Ефимов, М. И. Даниленко,  
А. И. Самелюк, А. Г. Покляцкий, В. Е. Федорчук, Г. П. Кислая

*Исследована возможность сварки полос из сплава  $Al_{94}Fe_{2.5}Cr_{2.5}Ti$ , упрочненного метастабильными наноквазикристаллическими частицами, методом трения с перемешиванием. Полосы из сплава  $Al_{94}Fe_{2.5}Cr_{2.5}Ti$  изготовлены без спекания путем экструзии водораспыленных порошков в предварительно вакуумированных и герметизированных капсулах. Методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа выявлено, что структура этих полос представляет собой наноразмерные зерна алюминиевой матрицы, упрочненной наноквазикристаллическими частицами. Выполнена сварка полученных полос методом трения с перемешиванием. Исследованы структура и механические свойства сварного соединения. Установлено, что при сварке трением с перемешиванием наноквазикристаллического алюминиевого сплава  $Al_{94}Fe_{2.5}Cr_{2.5}Ti$  в шве формируется равномерная смесь зерен матрицы с частицами квазикристаллов. Показано, что в зоне термомеханического воздействия на границе сопряжения шва с основным материалом в процессе сварки происходит переориентация направлений волокон полосы благодаря пластической деформации, вызванной вращательным и поступательным перемещениями инструмента для сварки трением. Твердость исходной полосы и зоны шва после примененных режимов сварки практически не отличается. Кроме того, за счет формирования более равномерной структуры твердость шва несколько выше. Прочность сварного соединения при комнатной температуре составляет 370 МПа, а при температуре испытания 300 °С — 170 МПа. Разрушение сварного соединения при комнатной температуре происходит по переходной зоне и зоне шва, а при 300 °С — по зоне шва. Показано, что сварка методом трения с перемешиванием является перспективной для получения*



сварных конструкций из сплавов алюминия, которые упрочнены наноразмерными метастабильными квазикристаллами, поскольку позволяет сохранить в шве квазикристаллическую структуру упрочняющих частиц.

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, сварка трением с перемешиванием, наноструктура, квазикристаллические частицы, механические свойства, структура, фазовый состав.

### **Structure and mechanical properties of welds of Al—Cr—Fe—Ti alloys with quasicrystalline phase**

Yu. V. Milman, N. P. Zakharova, M. O. Iefimov, M. I. Danylenko,  
A. I. Sameljuk, A. G. Pokliatsky, V. Ye. Fedorchuk, G. P. Kysla

*The structure and mechanical properties of strips from  $Al_{94}Fe_{2.5}Cr_{2.5}Ti$  alloy, made without sintering, by extrusion of powders obtained by spraying the melt by high pressure water in pre-evacuated and sealed capsules were studied. It was shown that the structure of these bands is characterized by the presence of nanocubic crystals and nanoscale grains of the aluminum matrix. The obtained strips were welded by the friction method with stirring. As a result of phase-structural studies, it was found that during friction welding with stirring of the  $Al_{94}Fe_{2.5}Cr_{2.5}Ti$  nanosquasicrystalline aluminum alloy, a uniform mixture of matrix grains with quasicrystal particles is formed in the weld. It is shown that in the zone of thermomechanical impact at the interface between the weld and the main material during the welding process, the directions of the strip fibers are reoriented due to plastic deformation caused by rotational and translational movement of the friction welding tool. The hardness of the main material of the strip and the zone of the welded joint, after the applied welding modes practically do not differ. Moreover, due to the formation of a more uniform structure, the hardness of the weld is slightly higher. The strength of the welded joint at room temperature is 370 MPa, and at a test temperature of 300 °C — 170 MPa. The destruction of the welded joint at room temperature occurs in the transition zone and the zone welded joint, and at 300 °C — in the seam zone. It is shown that the method of producing permanent joints by friction with stirring is promising for the production of welded structures from aluminum alloys, which are strengthened by nanosized metastable quasicrystals, since it allows you to save the quasicrystalline structure of the strengthening particles in the seam.*

**Keywords:** aluminum alloys, friction stir welding, nanostructures, quasicrystalline particles, mechanical properties, structure, phase composition.